

基于遗传算法的空调水系统优化控制研究

孟 华¹, 龙惟定¹, 王盛卫²

(1.同济大学,上海 200092 2.香港理工大学,香港)

摘要: 提出一种优化控制策略,采用基因遗传优化算法,能够快速准确地获得各控制变量在预测时间内的最优设定值。实时仿真试验表明,该策略与固定设定值的控制方式以及局部层次的优化控制方式相比,能够在满足控制稳定性的前提下最大限度地节约整个空调水系统的总能耗。

关键词: 遗传算法; 空调系统; 实时在线; 优化控制

中图分类号: TU831.3*6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-7237(2007)01-0039-04

Study on Optimal Supervisory Control in a Central Chilled Water System Based on Genetic Algorithm

MENG Hua¹, LONG Wei-ding¹, WANG Sheng-wei²

(1.Dept. of Building Facility and Management Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2.Dept. of Building Services Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hongkong, China)

Abstract: A kind of real-time online optimal supervisory control strategy of a central chilled water system is presented. It can quickly forecast the optimal set points of different control variables with genetic algorithm. The simulating results show that it can minimize total energy consumption of the system compared with the way of fixed set points strategy and the local optimal supervisory one, while still keep control stability.

Key words: genetic algorithm; air-conditioning system; real-time online; optimal control

0 引言

优化算法是优化控制研究的重要方面。空调领域的优化控制问题往往具有多变量、非线性、不连续且多峰值特点,各传感器和下位机控制器的输出信号易受外界电磁干扰而致使目标函数往往带有一定程度的噪声,另外,系统层次实时在线的优化控制更增加了寻优计算的计算量和严格时间性要求,这就对相应的优化问题提出了很高的要求,也加大了优化计算的难度。House 和 Smith^[1]采用 SQP(Sequential quadratic program)方法来计算空调系统的优化控制变量;Nizet 等^[2]采用共轭梯度法求解优化控制问题等,但研究表明,这些方法都有明显的缺陷,其计算收敛速度强烈地取决于初始点的选取方式,在控制变量的实际变化范围内,当目标函数带有一定噪声时,其寻优计

收稿日期: 2006-11-27

算往往误入歧途,而难以排除信号干扰;当目标函数出现不连续、多峰或不可微分时,其寻优计算也很容易停止于非最优的峰值上,而难以求得全局最优解。

近年来有采用基因遗传算法(GA)进行空调优化控制问题的求解报道^{[4][5]},研究表明,在空调系统优化控制问题中,与许多传统的优化算法相比,GA 显示了独特的优越性,它直接利用适应度函数值获得搜索信息,同时采用多点搜索,通过对当前群体进行选择、杂交、突变来产生新一代群体,其概率转移规则也能大大增加搜索过程的灵活性,具有很好地优势。有鉴于此,本文将采用基因遗传算法对空调水系统进行优化控制研究。

1 空调系统及相应的控制系统描述

以某商务大楼为仿真研究对象,该大楼总面积约 74000 m²,冷源为 5 台大小相同的离心式冷水机组(四

[4]张雄,韩继红.矿渣微粉对减水剂效果影响及其作用机理[J].混凝土,1999(6):34~36.

(ZHANG Xiong, HAN Ji-hong. Effect of ground granulated blast furnace slag powder on reducing-water admixture and its mechanism[J]. Concrete, 1999(6):34~36.)

[5]冯乃谦.海洋与近海工程混凝土耐久性设计与检测[J].建筑科技情报,2003(1):1~6.

(FENG Nai-qian. Durability design and detecting of marine engineering con-

crete[J]. Science and Technology Information in Buildings, 2003(1):1~6.)

作者简介: 王成启(1964-),男,安徽省繁昌县人,博士,毕业于同济大学材料学专业,现从事研究方向为高性能胶凝材料及海工高性能混凝土等方面的研究,高级工程师。

单位地址: 上海市肇嘉浜路 829 号上海港湾工程设计研究院研发部(200032)

联系方式: 021-64399960-807;E-mail:tjuwcq@163.com

用一备), 每台设计冷量 3100 kW。每台冷机配备一台定流量一级冷冻水泵, 各泵随机组压缩机的启停而启停。各台冷水机组输出的冷冻水集中后, 再由四台变频二级泵(一台备用)输送到大楼各层的 AHU。

在冷却水侧共有 4 台大小相同的冷却塔, 每台中具有 2 台可由高、低档转速调节风量的风扇, 在实际运行时采取 1 台冷却塔中 2 台风扇同时联动的控制方式。从各台冷机流出的冷却水混合后, 按流量平均分配到各台实际运行的冷却塔中, 对于风扇停转的冷却塔, 则关闭进水管路的电动蝶阀以切断水流。经冷却塔冷却的水先通过积水池充分混合均匀后再由 4 台相同的冷却泵送入冷机。

该商务楼从使用上可以划分为五个不同的区域, 每个区域都有若干个相同的 AHU, 其中四个区各有 AHU 20 台, 第五区具有 AHU 25 台。其中某些区的部分办公用房和一些重要设备房间需要全年供冷, 包括节假日, 因此, 冷机系统始终运行, 这样使得实际系统的冷负荷即使在 1d 之内也变化很大。

整个空调水系统在控制方面包括: 根据冷冻水出水温度来调节离心机的预旋导叶角度和开/停机组的数目; 根据最不利管路中 AHU 两端的冷冻水供回水压差来调节二级变频泵的输入频率, 以控制冷冻水的实际输送量; 根据冷却水供水温度与环境湿球温度的温差, 来调节各台冷却塔风扇的转速及开/停台数; 通过感应 AHU 的送风温度来调节流经表冷器二通阀的冷冻水流量。

2 优化控制模型的建立

以“冷冻水供水温度”、“最不利用户端 AHU 压差”及“实际运行中所有冷却塔风扇的总风量”作为优化控制变量, 从用户端需求侧出发, 根据商务大楼一年四季的实测负荷, 以整个空调水系统的总能耗为目标函数建立了优化控制的预测模型^[9]。该模型基于简单的物理特性及自适应控制技术的模型参数在线辨识, 既能反映空调运行的实际特点, 同时计算量适中, 能够通过自校正式的在线仿真对系统的运行特性和控制特性进行实时预测。

3 基于遗传算法(GA)的优化控制策略的仿真验证

编制了优化控制变量的寻优计算程序, 以“最大允许进化代数”及“最优个体适应度和群体平均适应度是否增加”两项指标来控制整个计算过程。由于 GA 优化计算必须给出各控制变量的寻优区间, 因此, 对三个控制变量的变化范围也给予一定约束。

3.1 GA 优化计算试验

用长度为 10 位的三个二进制编码串分别表示待优化的三个控制变量, 并将其连接组成一 30 位长的二进制编码串。给定一组水系统预测模型的输入参数, 取模拟时间步长和预测时间步长都等于 6s, 设三

个控制变量的寻优区间分别为 t_{chj} [6, 8](), P_{AHU} [260, 280](kPa), M_a [87.75, 175.5](kg/s); 取 GA 优化计算的运行参数为: 群体个数 18, 最大进化代数 120, 杂交概率 0.6, 突变概率 0.018。

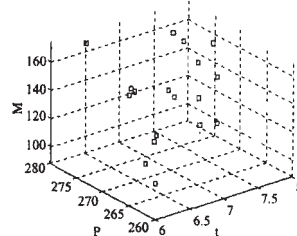


图 1 GA 优化计算中初始群体的个体分布

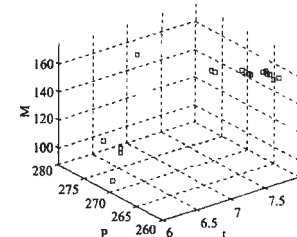


图 2 GA 优化计算中第 10 代群体的个体分布

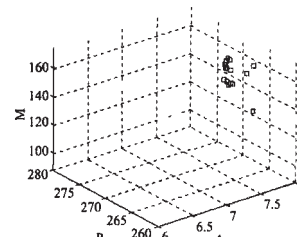


图 3 GA 优化计算中第 100 代群体的个体分布

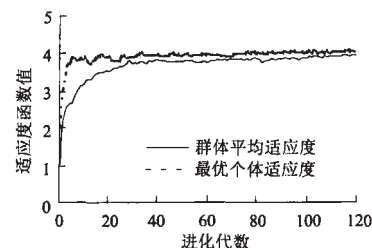


图 4 GA 优化计算试验

图 1~图 3 分别显示了 GA 优化计算中初始群体、第 10 代群体和第 100 代群体的个体分布情况, 从图中可见, 初始群体中的每个个体基本在给定的寻优区间内较均匀地分布; 当进化到第 10 代时, 群体中个体的分布已经开始相对集中于某些区域, 而进化到第 100 代时, 个体更加集中于某个区域附近, 这就是最优点。从这个 GA 优化计算试验可见, 随着进化的不断进行, 群体中适应度较低的个体被逐渐淘汰, 而适应度较高的个体则越来越多, 最终获得控制变量的最优解。图 4 给出了 GA 优化计算试验的进化过程, 可见在 GA 寻优计算中, 随着进化代数的不断增加, 最优个体适应度和群体平均适应度虽然有上下波动现象, 但总体而言呈上升趋势, 直到达到最大进化代数且两个适应度值都保持稳定, 该 GA 优化计算结束。

3.2 优化控制策略的仿真验证

分别选择一年中的夏、春、冬季三个典型试验日,

利用实测负荷(图 5)对优化控制策略进行仿真验证。

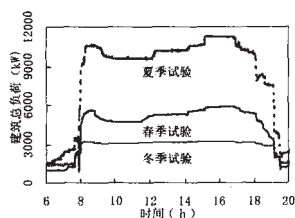


图 5 不同季节实测建筑总负荷

3.1 中的 GA 优化计算是针对一组给定的水系统预测模型输入参数进行的，而在实际的仿真试验中，由于不同试验日及每个试验日的不同采样时刻，水系统预测模型的输入参数是实时变化的，因此，需要合理地选取 GA 运行参数，使所有优化计算的最大进化代数一般都在 100 代左右。通过仿真试验，选取模拟时间步长 60s，预测时间步长和采样时间步长都为 120s，取 GA 优化计算的运行参数为：群体个数 18、杂交概率 0.6、突变概率 0.018。空调运行时间为 6~20h，系统中的三个优化控制变量设定值由优化计算实时给出，冷机、冷却塔风扇、冷却泵、冷冻泵的运行台数控制策略按^[6]的方式进行。

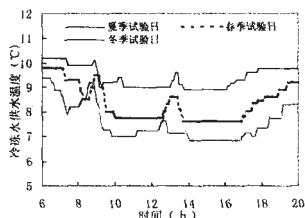


图 6 冷冻水供水温度在不同试验日的优化设定值

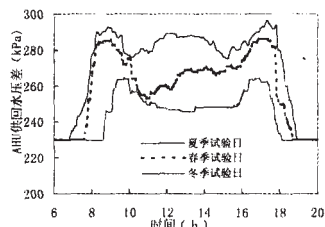


图 7 AHU 供回水压差在不同试验日的优化设定值

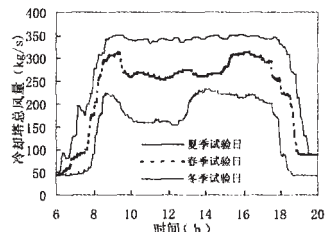


图 8 冷却塔总风量在不同试验日的优化设定值

图 6~ 图 8 给出了不同试验日 3 个控制变量的优化设定值。由图可见，无论是不同季节的试验日、还是同一试验日内的不同时段，当空调负荷发生变化时，优化控制策略能够在目标函数极值的条件下从系统地角度实时调整各控制变量。以夏季为例，图 9 和图 10 给出了冷冻水供水温度及 AHU 供回水压差预测值与实际值的对比，可见在每个采样时刻，当优化控

制给出各控制变量在预测时间内的最优设定后，各下位机控制回路基本上能够根据设定值进行稳定控制，使系统中实际的各控制变量都能够基本维持设定值。可见该控制策略具有较好的控制稳定性。

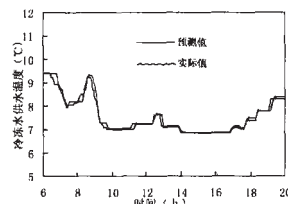


图 9 夏季冷冻水供水温度的控制效果

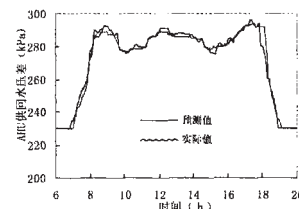


图 10 夏季 AHU 供回水压差的控制效果

为检验优化控制策略对整个系统的能耗影响，限于 3 个试验日内，分别选择 3 种不同的控制策略对系统进行实时控制的仿真计算，分别为：固定设定值（策略 I）、采用具有变速泵的冷冻水供水系统优化方案^[7]（策略 II）、采用本文的优化控制方案（策略 III）。在策略 I 中的固定设定为：AHU 出风温度 13℃，冷却水供水与环境湿球温差 4℃，冷冻水供水温度 7.5℃，AHU 供回水压差 300kPa；在策略 II 中，除实时优化的控制变量外，其他固定设定同策略 I。

采用不同控制策略进行实时控制下系统的能耗对比见表 1。从这些仿真计算结果可以看出，采用策略 III 时的水系统总能耗最低，在 3 个不同季节试验日中，分别比策略 I 节能 3.62%、7.7%和 9.43%、比策略 II 节能 0.94%、1.58%和 1.08%。这说明采用策略 III 进行实时控制，水系统总的运行状况不仅优于采用固定设定的策略 II，同时也优于从局部优化角度出发的策略 II。

总之，通过以上的仿真计算和分析对比可以看出，利用本文提出的优化控制策略对系统进行实时控制，具有一定的可实施性和控制稳定性，同时较固定设定值的控制方式、以及从局部角度进行优化的控制方式都具有更多的节能优势。

4 结束语

提出一种优化控制策略，其以空调水系统总能耗为目标函数，利用自适应的模型参数在线辨识技术，能够通过自校正的在线仿真对系统的各控制变量以及各设备的启停运行模式进行实时预测，同时，采用基因遗传优化算法快速准确地获得各控制变量在预测时间内的最优设定值。通过实时仿真研究可以看出，该控制策略与固定设定值的控制方式以及局部层次的优化策略相比，能够在满足控制稳定性的前提下

表 1 在不同优化控制策略实时控制下系统的能耗比较(表中能耗值均为各试验日内 6 时 ~ 20 时的累计值)

	试验工况	冷机能耗(10 ³ kJ)	二级泵能耗(10 ³ kJ)	冷却塔风扇能耗(10 ³ kJ)	总能耗(10 ³ kJ)
夏季试验日	策略 I	97.32	28.11	0.98	126.41
	策略 II	95.38	26.64	0.96	122.98
	策略	94.21	26.59	1.03	121.83
	(比策略 I)节能(%)	3.20	5.41	-5.10	3.62
	(比策略 II)节能(%)	1.23	0.19	-7.30	0.94
春季试验日	策略 I	81.77	18.92	0.83	101.52
	策略 II	76.92	17.49	0.79	95.2
	策略	75.28	17.53	0.89	93.7
	(比策略 I)节能(%)	7.94	7.35	-7.23	7.70
	(比策略 II)节能(%)	2.13	-0.23	-12.66	1.58
冬季试验日	策略 I	49.32	11.17	0.46	60.96
	策略 II	45.52	9.86	0.43	55.81
	策略	44.83	9.88	0.50	55.21
	(比策略 I)节能(%)	9.10	11.55	-8.70	9.43
	(比策略 II)节能(%)	1.52	-0.20	-16.30	1.08

最大限度地节约整个空调水系统总能耗,具有一定的可实施性,可为大型楼宇 IBMS 系统的预测和优化控制提供理论依据。

参考文献:

[1]House, J. M.,T. F. Smith. Optimal control of a thermal system. ASHRAE Trans.1991.
[2]House, J. M., T. F. Smith. A system approach to optimal control for HVAC and building systems.ASHRAE Trans.1995.
[3]Nizet J. L., J. Lecomte L., and F. X. Litt. Optimal control applied to air conditioning in building.ASHRAE Trans. 1984.
[4]S. W. Wang, X. Q. Jin. Model-based optimal control of VAV air-conditioning system using genetic algorithm, Building and Environment Vol. 35, 2003.
[5]Lu Lu, W. J. Cai, et al.HVAC system optimization-condenser water loop. Energy Conversion and Management. Vol. 45, 2004.
[6]孟华,王盛卫,龙惟定.空调水系统层次实时在线优化控制预测模型的

研究[J].同济大学学报(自然科学版), No. 5, 2006.
(MENG Hua, WANG Sheng-wei, LONG Wei-ding. Study on a real-time online optimal supervisory predictive model in central air-conditioning system[J]. Journal of Tongji University.Natural Science. No. 5, 2006.)
[7]孟华,龙惟定,王盛卫.集中空调冷冻水侧局部系统上位机控制器的实时控制分析[J].暖通空调, 2005,No11.
(MENG Hua, LONG Wei-ding, WANG Sheng-wei . Real time control analysis of chilled water supervisory controller in central air-conditioning [J]. Journal of HV&AC. No. 11, 2005.)

作者简介: 孟华(1968-),女,北京人,毕业于同济大学热能系供热、供燃气、通风及空调工程专业,博士,副教授,研究方向为建筑节能及优化控制。
单位地址: 上海中山北路 727 号 同济大学(沪北校区)楼宇设备工程与管理系(200070)
联系方式: 021-66052687, 13917493624;
E-mail:mengh@mail.tongji.edu.cn

(上接第 31 页)参考文献:

[1]赵立华,董重成,贾春霞.外保温墙体传湿研究[D].哈尔滨建筑大学学报,2001(6)78~81.
(ZHAO Li-hua, DONG Zhong-cheng, JIA Chun-xia. Moisture Transfer Through External Insulation Wall[D]. Journal of Harbin University of C.E. & Architecture,2001(6)78~81.)
[2]GB50176-93,民用建筑热工设计规范[S].
(GB50176-93, Design Criterion of thermal engineering in civil buildings[S].)
[3]周雍.建筑传湿的不利影响及处理原则[J].沈阳建筑工程学院学报, 1999(2):83~186.
(ZHOU Yong. Principle and methods resisting the negative influence of moisture transfer in fender structure of Building [J]. Journal of Shengyang

Arch. and Civ.Eng. Inst 1999(2):183~186.)
[4]张秀梅.调湿墙体材料及其调湿性能的研究[D].天津大学硕士学位论文,2005,17~18.
(ZHANG Xiu-mei. Research on humidity-controlling wall materials and its moisture absorption and desorption capability [D]. Tianjin University, 2005,17~18.)

作者简介: 孔凡红(1980-),女,黑龙江人,哈尔滨工业大学在读博士,主要研究方向为建筑节能。
单位地址: 黑龙江省南岗区海河路 202 号哈尔滨工业大学二区市政环境工程学院 1328 室(150090)
联系方式: 13796761934;E-mail:tian12388@sohu.com